



## Compósitos Porosos para Absorção Eletromagnética na Banda X com Ferrocarbonila e Biochar.

**Mariana Helena de Oliveira Antunes <sup>1</sup>, Ábda Moria Soares Cunha <sup>1</sup>, Flávia Lega Braghiroli <sup>2</sup>, Giovana Silva Cembranelli <sup>3</sup>, Felipe de Moraes Yamamoto <sup>3</sup>, Braulio Haruo Kondo Lopes <sup>3</sup>, Maurício Ribeiro Baldan <sup>3</sup>, Chen Ying Yan <sup>3</sup>.**

<sup>1</sup>Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos, São José dos Campos, SP, Brasil

Aluno de Iniciação Científica do curso de Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores - CMS.

<sup>2</sup>Université du Québec em Abitibi - Témiscamingue

<sup>3</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil

mariana.antunes01@fatec.sp.gov.br

---

**Resumo.** *Materiais compósitos para o setor aeroespacial tem ganhado a atenção nas pesquisas para o seu desenvolvimento pelo seu ótimo desempenho e boa relação quanto a peso e resistência. Os compósitos a base de particulados elétricos e magnéticos tem uma boa taxa de absorção de radiações eletromagnéticas, que possuem aplicabilidade como dispositivos eletrônicos, composições de estruturas e sistema de transmissão de dados. O presente trabalho tem por objetivo realizar um estudo sobre compósitos porosos capazes de absorver ondas eletromagnéticas por meio do uso de Ferrocarbonila e Biochar ativado quimicamente com KOH dispersos em uma matriz de silicone, para a Banda X (8,2 – 12,4 GHz). Os resultados mostram que o compósito gerado com diferentes quantidades na composição de suas matrizes pode atingir um potencial de 99,98% de absorção na frequência de 9,78 GHz para a concentração de 2% de KOH.*

---

**Palavras-chave:** Ferrocarbonila; Biochar; Banda X; Borracha de silicone; Material poroso.



## 1. Introdução

Os materiais compósitos estão cada vez mais sendo estudados e atraindo o olhar de pesquisadores ao redor do mundo devido ao seu alto desempenho e excelente relação de resistência e baixo peso (Shu *et al.*, 2018). A comunicação utilizando satélites tem como base diferentes faixas de frequência, sendo uma delas, a banda X. Com isso, os materiais compósitos são de grande importância, pois podem apresentar altos níveis de atenuação atuando como proteção na comunicação com a vantagem de baixo peso (Ge *et al.*, 2018).

Os materiais magnéticos, como a Ferrocarbonila (FC), tem ganhado espaço no processamento de MAREs (Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética) (Ge *et al.*, 2018). Estes materiais possuem a capacidade de aumentar o caráter magnético das matrizes e consequentemente intensificam a atenuação das ondas eletromagnéticas. Os MAREs são necessários em aplicações na área civil e militar, como por exemplo em sistemas de telecomunicações (da Silva *et al.*, 2009) e dispositivos usados em satélites (Gama, 2006). Os compósitos poliméricos têm sido de grande interesse em diversos setores e estão sendo estudados frequentemente (da Silva *et al.*, 2009; Klygach *et al.*, 2019). No entanto, é necessário adicionar a uma matriz polimérica um aditivo que seja eficaz em pequenas concentrações, facilitando o processamento para aumento do desempenho e redução de custos e de peso (Chung, 2001) e para complementar, é possível a redução do peso por meio da formação de poros internos. Para desenvolver um material absorvedor, é essencial a utilização de um material dielétrico como matriz e um material condutor ou magnético como aditivo, e por isso o compósito híbrido tem sido bastante estudado (Portes *et al.*, 2019). O compósito híbrido é definido pela combinação de partículas elétricas e magnéticas em um mesmo material, proporcionando propriedades como leveza, estabilidade mecânica e alto desempenho eletromagnético ao material (Lopes *et al.*, 2020). A borracha de Silicone demonstra baixa densidade, estabilidade química, alta resiliência e boa processabilidade, permitindo assim a redução de vibrações mecânicas, resistência à corrosão e processamento de geometrias complexas (Chen *et al.*, 2018).

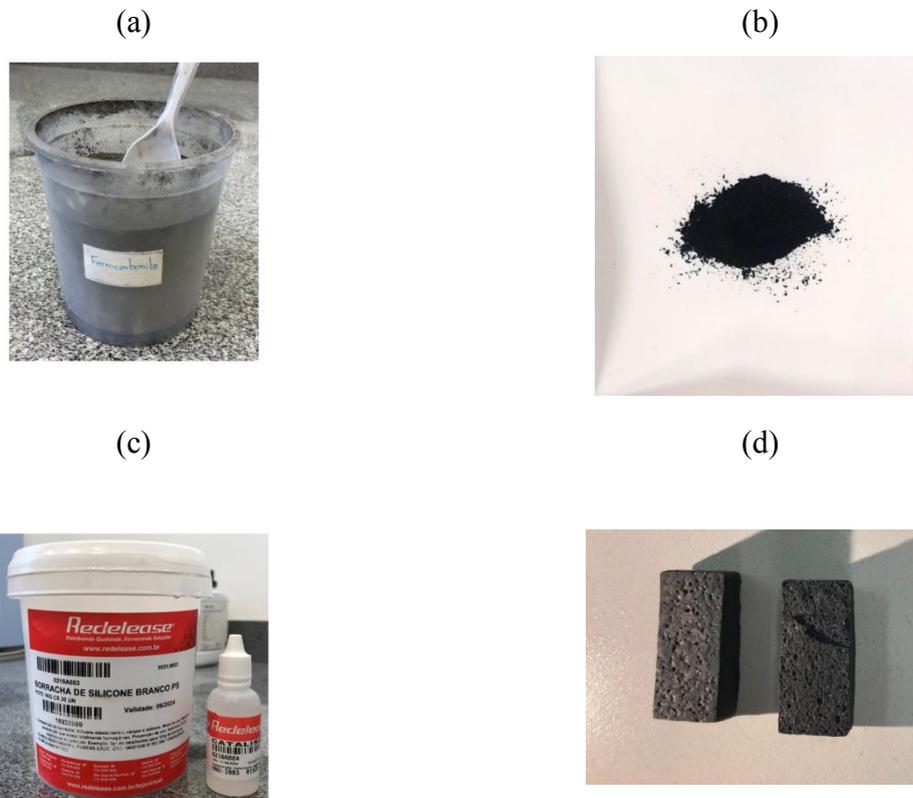
No presente trabalho, foi realizado um estudo de um material compósito a base de aditivos: elétrico, sendo o Biochar ativado quimicamente com KOH e, magnético, sendo a Ferrocarbonila, dispersos em uma matriz polimérica com o intuito de analisar a influência da composição do material no potencial de absorção da radiação eletromagnética. Para a caracterização deste material foram analisadas as propriedades de permissividade elétrica e permeabilidade magnética a partir do modelo matemático NRW. O método da refletividade foi utilizado para caracterizar os materiais compósitos e identificar a faixa de frequência com o maior potencial de absorção na banda X.

## 2. Metodologia

O presente trabalho foi realizado a partir de 2 materiais compósitos porosos com quantidades diferentes de um material de origem sustentável, denominado Biochar KOH (KOH). As composições dos materiais são baseadas em particulados de Ferrocarbonila (FC), Figura 1(a) com caráter magnético e KOH, Figura 1 (b), com caráter elétrico. Os particulados foram dispersos manualmente em uma matriz de borracha de silicone da marca Redelease, Figura 1 (c), em um molde com dimensões de 22,9 mm x 10,2 mm e espessura de 9,77 mm. As



amostras foram desenvolvidas com o intuito de gerar poros, Figura 1 (d), para o estudo do potencial de atenuação.



**Figura 1. (a), (b) e (c) Materiais utilizados, (d) Foto da amostra.**

Para o processamento das amostras houve a determinação da composição dos compósitos, homogeneização por meio de agitação, cura do compósito sobre pressão controlada, conformação das amostras em um molde para a banda X e a obtenção do material compósito, as etapas estão expressas conforme a Figura 2. O controle da proporção da massa dos particulados magnéticos e elétricos foi realizado através de uma balança analítica de modelo FA-2204 da empresa SCALE com 4 casas decimais, afim de garantir com precisão a variação de cada componente, na Figura 3(a). Ambos os compósitos colocados em seus moldes, foram curados com o uso de vácuo utilizando o sistema da Figura 3 (b). A pressão utilizada foi de -450mmHg, durante 1 hora.

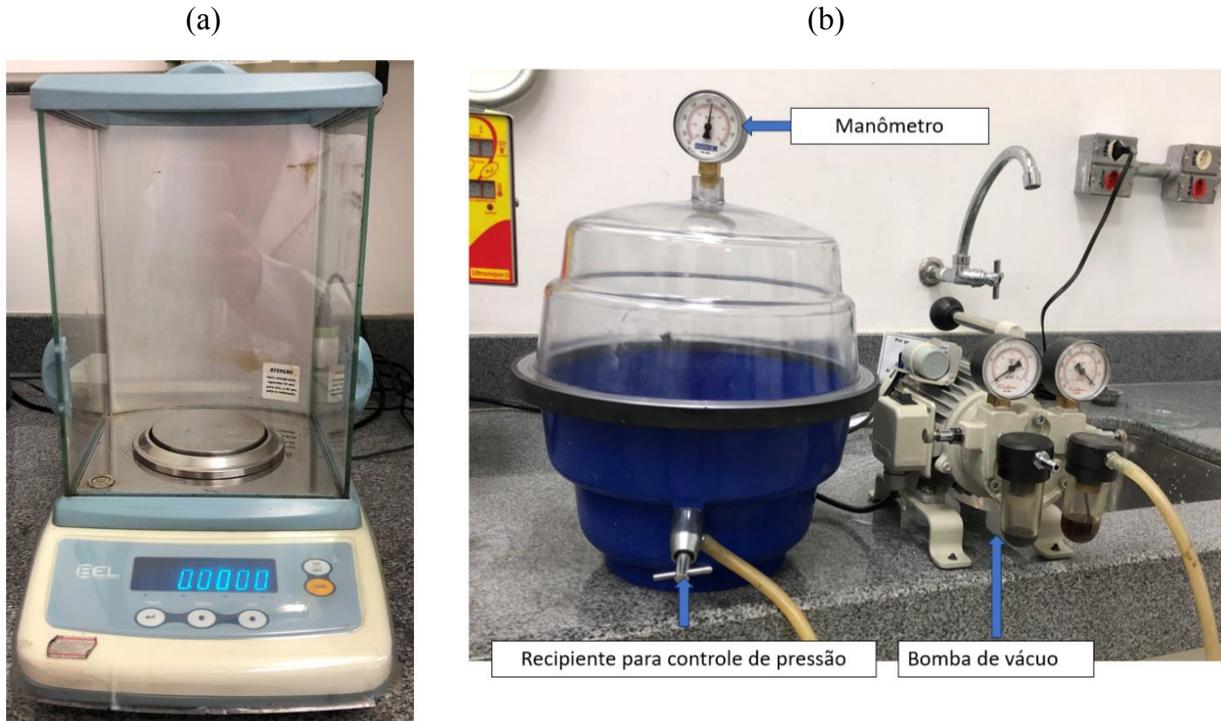


**Figura 2. Etapas do processo da amostra.**

A composição dos 2 materiais se baseia no uso de 1%, 2% e 3% de KOH conforme Tabela 1, na qual a quantidade em porcentagem é referente a porcentagem do peso em relação a massa de silicone utilizada para compor os compósitos. Contudo, a amostra com 3% de KOH apresentou uma degradação do material não sendo possível o processamento da mesma, devido a uma saturação do silicone ao atingir a máxima taxa de solubilidade.

**Tabela 1. Descrição das Amostras.**

	Composição
Amostra 1	1% KOH + 70% FC
Amostra 2	2% KOH + 70% FC



**Figura 3. (a) Balança Analítica e (b) Sistema de vácuo.**

Para caracterizar as amostras foi utilizado um Analisador de Rede Vetorial, ou em inglês *Vector Network Analyzer* (VNA), Figura 4 (a), na faixa de 8,2 a 12,4 GHz (Banda X). A caracterização eletromagnética foi realizada usando o modelo matemático de Nicholson – Ross – Weir (NRW) para um guia de onda retangular, Figura 4 (b) e o ensaio de refletividade, Figura 4 (c). O NRW utiliza os sinais referentes aos parâmetros S medidos no VNA, medidos através do guia de onda. O parâmetro S descreve a razão entre o potencial de uma determinada radiação incidente na amostra e os potenciais dos respectivos sinais de respostas devido aos fenômenos de reflexão e transmissão (Plyushch et al., 2019). Desta forma a partir das respostas em termos de reflexão e transmissão, o modelo NRW permite a definição das propriedades permissividade elétrica complexa ( $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$ ) e permeabilidade magnética complexa ( $\mu = \mu' - j\mu''$ ) (Chen et al., 2019). A relação entre a parcela real e a parcela imaginária das propriedades permissividade e permeabilidade é analisada através da tangente de perda para análise da razão entre os fatores dissipativos ( $\epsilon''$ ,  $\mu''$ ) e capacitivos ( $\epsilon'$ ,  $\mu'$ ) no interior do material. As tangentes de perdas elétrica e magnética são definidas conforme as equações 1 e 2.

$$\tan \delta\epsilon = (\epsilon''/\epsilon') \quad \text{Eq. 1}$$

$$\tan \delta\mu = (\mu''/\mu') \quad \text{Eq. 2}$$

O potencial de absorção eletromagnética foi caracterizado a partir do método de Refletividade no guia de onda retangular, que é mostrado na Figura 4 (c). Este método é realizado com a utilização de uma placa metálica atrás da amostra dentro do guia de onda retangular, na qual a placa metálica impede que ocorra o fenômeno de transmissão. Na Refletividade, o analisador



# 14° WETE

Workshop em Engenharia e Tecnologia Espaciais

de rede realiza a medição do sinal refletido e o sinal não refletido é definido como o potencial de absorção (Chen et al., 2019).

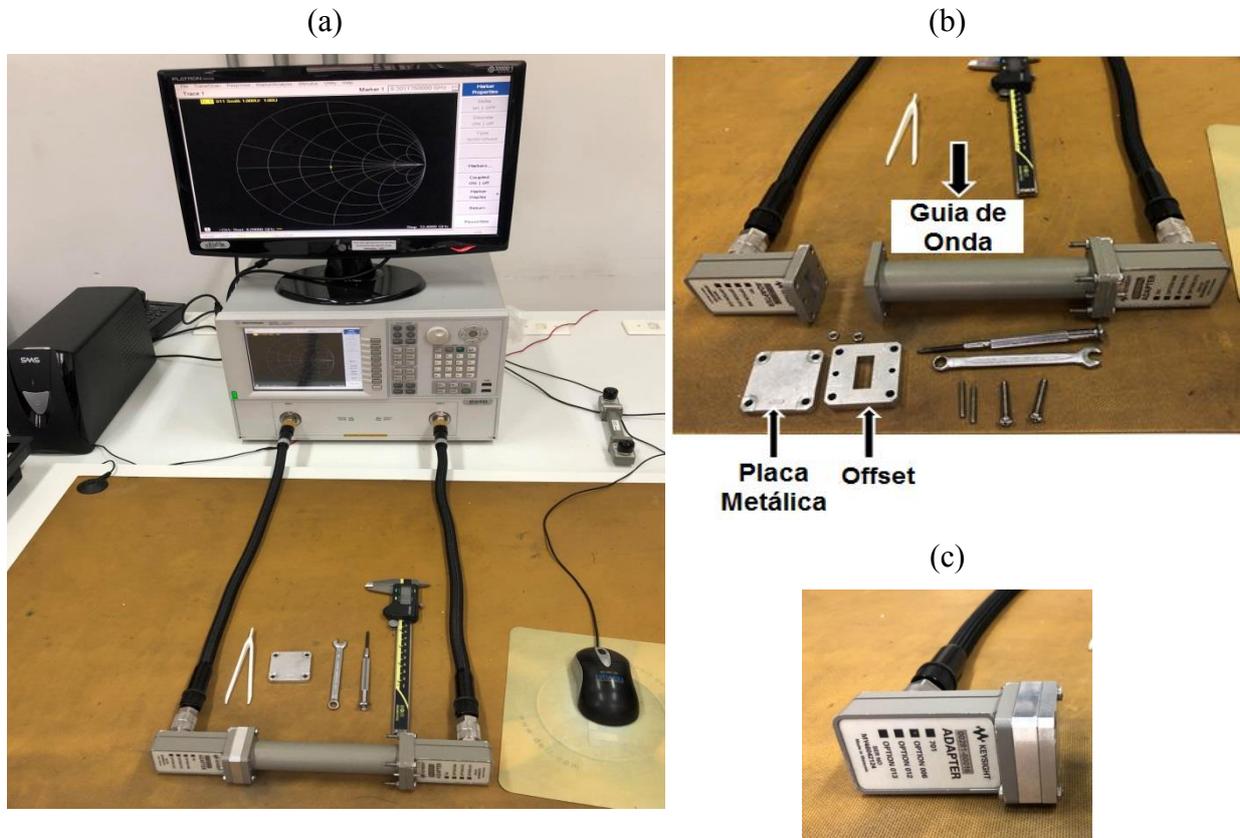


Figura 4 – (a) Analisador de Rede Vetorial, (b) Kit do guia de onda da Banda X, e (c) setup para o ensaio de refletividade.

O método de Refletividade é definido matematicamente pela equação 3, utilizando a relação de impedâncias descritas pela equação 4. Onde  $Z_{in}$  é a impedância do meio material,  $\mu_r$  é a permeabilidade absoluta relativa,  $\epsilon_r$  é a permissividade absoluta relativa,  $t$  é a espessura da amostra,  $f$  é a frequência analisada, e  $c$  é a velocidade da luz (Ge et al., 2018).

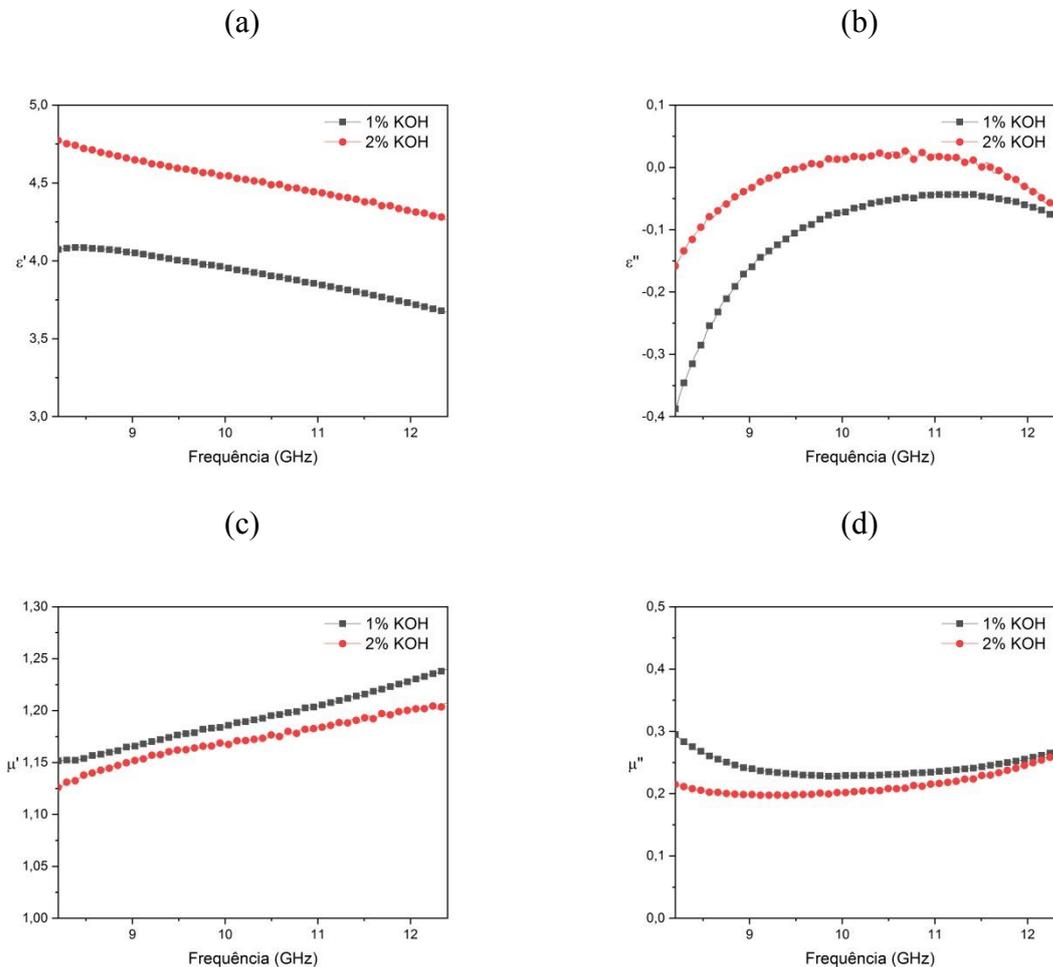
$$Refletividade (dB) = 20 \log_{10} \left| \frac{Z_{in} - 1}{Z_{in} + 1} \right| \quad \text{Eq. 3}$$

$$Z_{in} = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh \left\{ j \left( \frac{2\pi f t}{c} \right) \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \right\} \quad \text{Eq. 4}$$



### 3. Resultados e Discussão

A figura 5 apresenta os resultados de permissividade elétrica, permeabilidade magnética. A Figura 6 apresenta os resultados de tangentes de perda elétrica e magnética. Os resultados demonstram que o aumento da concentração de KOH teve uma influência positiva no valor da parcela real da permissividade ( $\epsilon'$ ), Figura 5 (a), alcançando valores próximos a um valor médio de 4,5, ao longo da Banda X. Contudo o uso do material KOH não apresentou variação significativa na parcela imaginária ( $\epsilon''$ ), Figura 5 (b), com valor médio de aproximadamente 0. Isto demonstra que a concentração de KOH utilizada não foi suficiente para gerar fenômenos de dissipação de energia, contribuindo apenas no aumento do caráter capacitivo dos materiais compósitos. O caráter magnético das amostras ( $\mu'$  e  $\mu''$ ) não apresentou variação relevante com a presença de KOH em ambas as concentrações do presente estudo, Figura 5 (c) e (d).



**Figura 5. Permissividade complexa (a) real e (b) imaginária, Permeabilidade (c) real e (d) imaginária.**

Os resultados de tangentes de perdas demonstram qual o caráter dos fenômenos de perda de energia prevalecem para o material. No presente estudo, os resultados indicam que o caráter magnético são mais relevantes ( $\tan \delta_\epsilon < \tan \delta_\mu$ ) no comportamento de atenuação dos



compósitos. Desta forma, é possível indicar que mesmo o KOH apresentando aumento no caráter capacitivo elétrico, a característica magnética proveniente da FC ainda é majoritária no material compósito. Em relação aos valores das tangentes de perda elétrica e magnética do compósito não houve diferença significativa quanto à variação da composição das amostras, apresentando picos de (-0,07) na tangente de perda elétrica, e na tangente de perda magnética houve picos de (0,06).

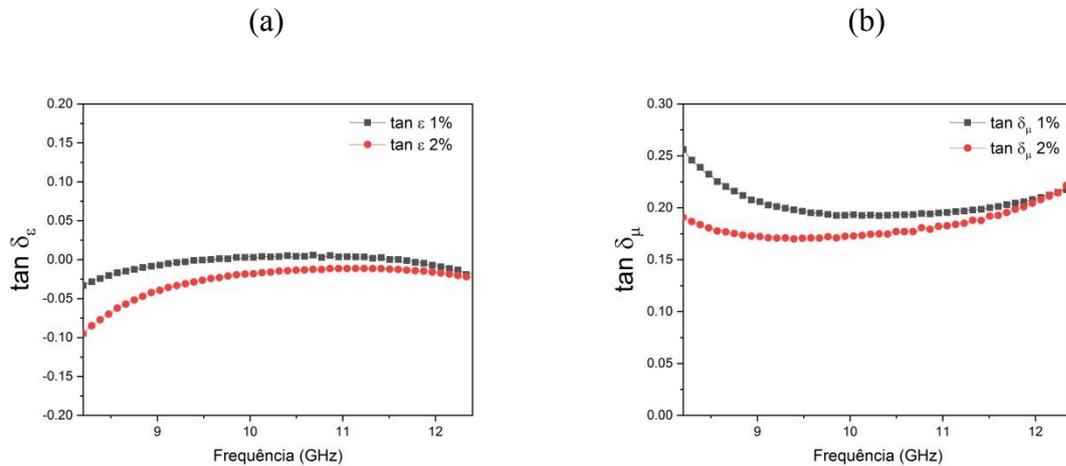


Figura 6. (a) Tangente de perda elétrica, (b) Tangente de perda magnética.

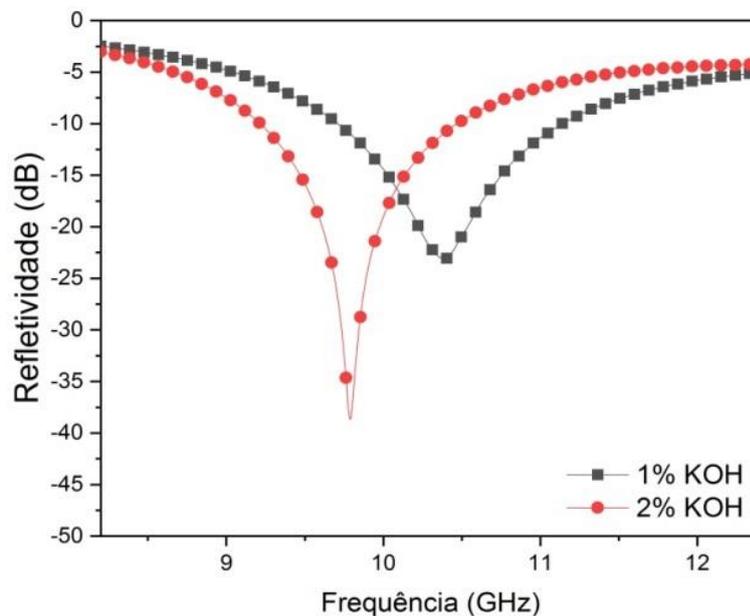


Figura 7 – Ensaio de refletividade para as amostras.

A Figura 7 apresenta os resultados do ensaio de refletividade para as amostras. O material analisado no presente trabalho apresentou um índice de atenuação relativamente alto, no valor de -38,67 dB (99,98% de absorção) na frequência de 9.78 GHz para a concentração de 2% de KOH. Enquanto o maior pico para o compósito com 1% de KOH foi de -23.13 dB (99,51% de absorção) na frequência 10,38 GHz. Os resultados indicam que o aumento da concentração de



KOH permitiu intensificar o potencial de atenuação, este fenômeno pode estar associado à capacidade do material KOH a fenômenos de perda de energia, como o efeito Joule (Lopes, 2020). Outro fator que também pode estar associado ao aumento da atenuação esta no fato de que o volume preenchido pelo material KOH é maior causando mais perda de energia por reflexões internas. Devido ao bom resultado no índice de atenuação na amostra com concentração de 2% de KOH não foi preciso utilizar a de 3%, visto que esta saturou.

**Tabela 2 – Comparação de estudos com o material KOH.**

Autor	Refletividade	Frequência	Referência
Yan.	-15,8 dB	16 – 17 GHz	H. Yan et al. (2023)
Chen.	-35,27 dB	4 – 6 GHz	T. Chen, J. Cai, D. Gong et al. (2023)
Zhou.	-18,7 dB	8 – 10 GHz	Y. Y. Zhou et al. (2023)

#### 4. Conclusão

No presente trabalho foi demonstrado ser possível realizar um compósito poroso à base de particulados elétrico e magnético. A variação da quantidade do composto elétrico demonstrou um aumento no potencial de absorção no método da refletividade. O compósito obtido no experimento atingiu bons valores de absorção, em torno de 99,98%. Assim, o presente trabalho demonstrou ser possível realizar um compósito a base de particulados elétrico e magnético de origem sustentável, que absorveu ondas eletromagnéticas na faixa da Banda X, com baixo peso e boa resistência.

***Agradecimentos:** O presente projeto foi desenvolvido com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) através da concessão de bolsa de Iniciação Científica, número de processo 171531/2023-0. Os autores agradecem também à FINEP, a CNPq e a ALTAIR pela licença dos softwares.*

#### Referências

- CHEN, C. Y. et al. (2018) “Microwave absorption properties of holey graphene/silicone rubber composites”, 135, pages 119–128. Composites Part B: Engineering. doi: 10.1016/j.compositesb.2017.10.001.
- CHEN, H. et al. (2019) “Closed-form representation for equivalent electromagnetic parameters of biaxial anisotropic honeycomb absorbing materials”, page. 085804. Materials Research Express. doi: 10.1088/2053-1591/ab2020.
- CHEN, Teng et al. Facile fabrication of 3D biochar absorbers dual-loaded with Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles for enhanced microwave absorption. Journal of Alloys and Compounds, v. 935, p. 168085, 2023.



# 14° WETE

Workshop em Engenharia e Tecnologia Espaciais

- CHUNG, D. D. L. (2001). Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon materials. *Carbon*, 39(2), 279–285. [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(00\)00184-6](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(00)00184-6).
- DA SILVA, V. A., Pereira, J. J., Nohara, E. L., & Rezende, M. C. (2009). Comportamento eletromagnético de materiais absorvedores de micro-ondas baseados em hexaferrita de Ca modificada com íons Co Ti e dopada com La. *Journal of Aerospace Technology and Management*, 1(2), 255–263. <https://doi.org/10.5028/jatm.2009.0102255263>.
- GAMA, A. M. (n.d.). Radiação Eletromagnética À Base De Ferro Carbonila E Silicene.
- KLYGACH, D. S., Vakhitov, M. G., Suvorov, P. V., Zherebtsov, D. A., Trukhanov, S. V., Kozlovskiy, A. L., Zdorovets, M. V., & Trukhanov, A. V. (2019). Magnetic and microwave properties of carbonyl iron in the high frequency range. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 490(June), 165493. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.165493>.
- LOPES, B. H. K., Portes, R. C., do Amaral Junior, M. A., Florez-Vergara, D. E., Gama, A. M., Silva, V. A., Quirino, S. F., & Baldan, M. R. (2020). X Band electromagnetic property influence of multi-walled carbon nanotube in hybrid MnZn ferrite and carbonyl iron composites. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(2), 2369–2375. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.12.068>.
- PLYUSHCH, A. et al. (2019) “Ultra-Light Reduced Graphene Oxide Based Aerogel/Foam Absorber of Microwave Radiation”, pages 213. *Materials*. doi: 10.3390/ma12020213.
- PORTES, R. C., Lopes, B. H. K., Do Amaral Junior, M. A., Florez-Vergara, D. E., Quirino, S. F., & Baldan, M. R. (2019). Effect of granulometric distribution on electromagnetic shielding effectiveness for polymeric composite based on natural graphite. *Science and Engineering of Composite Materials*, 26(1), 531–539. <https://doi.org/10.1515/secm-2019-0037>.
- YAN, Han et al. Pore-regulation in 2D biochar-based flakes towards wideband microwave absorption. *Chemical Engineering Journal*, v. 464, p. 142568, 2023.
- ZHOU, Yuanyuan et al. In-situ grown NiCo bimetal anchored on porous straw-derived biochar composites with boosted microwave absorption properties. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, v. 30, n. 3, p. 515-524, 2023.